



NASTUPANJE ERE PRECIZNIH KOZMOLOŠKIH MJERENJA

Nobelova nagrada za otkriće prirode pozadinskog zračenja putem satelita COBE

Ivica Picek¹, Zagreb

Nobelovu nagradu iz fizike za 2006. godinu podijelili su *John C. Mather* iz NASA-inog Goddard Space Flight centra i *George F. Smoot* s Kalifornijskog sveučilišta u Berkeleyu u SAD, “za otkriće da kozmička mikrovalna pozadina ima oblik zračenja crnog tijela, te za otkriće njezine anizotropije”. Riječ je o dvojici fizičara elementarnih čestica, koji su na samom početku svoje znanstvene karijere uočili da im se svemir nudi kao prirodni laboratorij za pokuse. Otkrićima do kojih su pri tome došli, otvorili su eru moderne kozmologije kao discipline u kojoj su moguća precizna mjerenja.

Era koja je prethodila pokusima satelita COBE

Konačna potvrda svemira “Velikog praska” došla je neočekivanim otkrićem Arnoa Penziasa i Roberta Wilsona iz 1964. godine. Riječ je o otkriću signala u mikrovalnom području, koji do nas dolazi podjednako iz svih smjerova neba, kozmičkoj mikrovalnoj pozadini (CMB, od engl. Cosmic Microwave Background), za što su Penzias i Wilson 1978. nagrađeni Nobelovom nagradom iz fizike. Iako je na takvo zračenje kao “jeku” Velikog praska u kojem započinje naš svemir ukazao George Gamow još 1948. godine, do otkrića se došlo slučajno. Dogodilo se da je rad Gamowa i njegovih studenata Alpher i Hermana u međuvremenu previđen ili zaboravljen. Naime, Robert Dicke i Jim Peebles s Princetona, koji su se početkom 60-tih upustili u nezavisnu potragu za tim zračenjem, uskoro su ustanovili da je stvar riješena otkrićem Penziasa i Wilsona, kojima su jedino mogli objasniti što je u stvari otkriveno. “Mjerenje temperature antene na 4080 MHz” grupe s Bell Labs, objavljeno je istovremeno s (ponovljenim!) teorijskim predviđanjem grupe s Princetona. Otkriće koje se posrećilo odjeknulo je na naslovnici New York Timesa i stavljeno je uz bok Hubbleovog otkrića širenja svemira, a čitava epizoda slučajnog otkrića svjedoči o tome da još sredinom prošlog stoljeća kozmologija nije uzimana ozbiljno. No to je otkriće označilo prvu prekretnicu u kozmologiji i povuklo je za sobom nove projekte.

Prvo što je još trebalo nezavisno potvrditi bilo je kozmičko porijeklo otkrivenog zračenja. Ukoliko je riječ o “jeki” Velikog praska, zračenje mora biti termičko (zračenje crnog tijela): ono je opisano poznatom Planckovom krivuljom zračenja, gdje valna

¹ Autor je redoviti profesor teorijske fizike. Bavi se problemima fizike elementarnih čestica u pristupu teorije polja te dodirnim točkama fizike čestica i kozmologije, <http://www.phy.hr/~picek/>.

duljina na kojoj je intenzitet maksimalan ovisi o temperaturi zračenja. Za zračenje temperature 3 K krivulja intenziteta ima vrh kod 2 mm, s time da je mjerenje Penziasa i Wilsona učinjeno u samo jednoj točki, na 7.35 cm. Uslijedila su i mjerenja na drugim valnim duljinama većim od 2 mm, koja su se uz neka odstupanja podudarala sa zračenjem crnog tijela. Problem je nastao s mjerenjima na strmijem dijelu krivulje, jer te kratke valne duljine apsorbira atmosfera. Pomoću rakete, u okviru američko-japanske kolaboracije, 1987. godine su konačno učinjena mjerenja na kratkim valnim duljinama. Rezultati mjerenja odstupali su od spektra zračenja crnog tijela i time izazvali niz spekulacija i potrebu za nezavisnim mjerenjima.

Drugi problem odnosio se na mjerenje mogućih anizotropija pozadinskog zračenja. Naime, ono bi se trebalo pokazivati nešto toplijim (na razini mK) u smjeru u kojem se gibamo kroz kozmičku pozadinu. To odgovara poznatom Dopplerovom učinku porasta frekvencije koji se opaža kad nam se izvor valova približava. Uz to, zamisliva su i dodatna mala odstupanja od izotropnosti zračenja, koja bi ukazivala na postojanje nehomogenosti u prošlosti svemira. Bez njih ne bi mogli objasniti kako je došlo do nakupljanja tvari u zvijezde i galaktike u svemiru. Slične varijacije u temperaturi odgovarale bi područjima koja su sjeme začetka nakupljanja tvari, da bi se to nakupljanje nastavilo gravitacijskim privlačenjem. Sve to skupa pozivalo je na preciznija izučavanja CMB-a, kakva bi se mogla provesti jedino putem satelitskih mjerenja. Prilika se ukazala 1974. godine, kad je američka svemirska agencija NASA obznanila otvoreni poziv za “nespecificirani astrofizički projekt”, iz kojega je rođen COBE.

Satelit COBE

COBE (COsmic Background Explorer) je zamišljen kao NASA-in prvi satelit namijenjen kozmološkim istraživanjima. Na NASA-in otvoreni poziv odazvale su se tri grupe fizičara sa svojim prijedlozima za tri instrumenta koja bi satelit trebao ponijeti;

FIRAS (Far InfraRed Absolute Spectrometer), koji bi provjerio da CMB ima spektar crnog tijela;

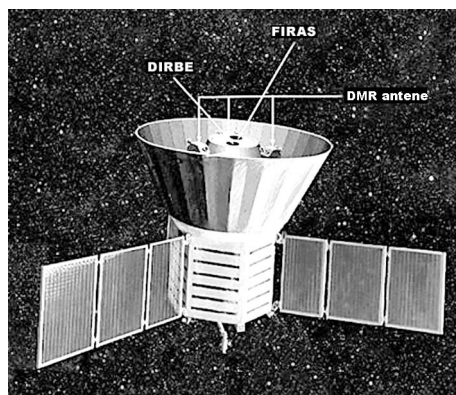
DMR (Differential Microwave Radiometer), koji bi uz “dipolnu asimetriju” uslijed opisanog gibanja u odnosu na apsolutni sustav Velikog praska, provjerio i postojanje drugih mogućih anizotropija;

DIRBE (Differential InfraRed Background Experiment), koji bi u infracrvenoj svjetlosti potražio prvotne objekte u svemiru (prve zvijezde i galaktike). S obzirom na broj izvora i količinu infracrvenog zračenja posvuda u svemiru, to se pokazalo najtežom misijom. No ipak je rasvijetljen niz pojava, od strukture Mliječne staze do difuzne svjetlosti Sunčevog sustava.

U ovom napisu ograničit ćemo se na dva instrumenta, FIRAS i DMR, koja su dovela do ovogodišnje Nobelove nagrade.

Za glavnog istraživača pokusa FIRAS imenovan je John Mather, rođen 1946. Nakon što je doktorirao iz fizike elementarnih čestica i kod Paula Richardsa na Berkeleyu stekao iskustvo na mjerenjima CMB-a pomoću balona, dobio je postdoktorsku poziciju na Goddardovom institutu za svemirska istraživanja. Tamo je, na sugestiju svojeg savjetnika Pata Thaddeusa, NASA-i predložio satelitsko mjerenje kozmičke mikrovalne pozadine. On je s vremenom postao ključna osoba i istinski pokretač cijelog tog poduhvata, u kojem je sudjelovalo više od tisuću ljudi širokog spektra zanimanja. Za glavnog istraživača pokusa DMR imenovan je George Smoot, rođen 1945. godine. Studij fizike i doktorat

iz fizike elementarnih čestica obavio je na Sveučilištu MIT, gdje je kod nobelovca Luisa Alvareza isprva radio na traženju antimaterije u kozmičkom zračenju. Nakon što je izvjesno vrijeme izučavao anizotropiju CMB-a na letovima NASA-inog špijuskog zrakoplova U-2, on zajedno s Alvarezom predlaže satelitsko mjerenje anizotropije.

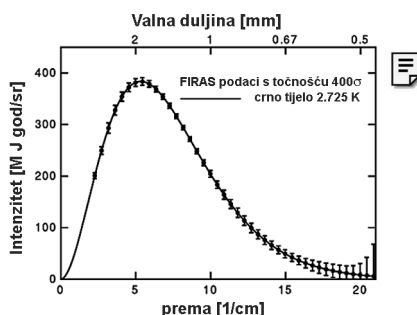


Slika 1. Prikaz satelita COBE i položaja njegovih instrumenata FIRAS, DMR i DIRBE.

Bilo je zamišljeno da sva tri prihvaćena instrumenta budu smještena na gornjem dijelu satelita COBE (slika 1). Pri tome su FIRAS i DIRBE smješteni unutar kriostata koji pomoću tekućeg helija održava temperaturu od 1.4 K, dok je DMR smješten na vanjskom dijelu satelita. Originalno je satelit u kružnu orbitu na visini od 560 milja trebala ponijeti raketa Delta, da bi NASA tražila promjenu dizajna satelita, kako bi se u orbitu lansirao putem Shuttlea. Konačno, nakon obustavljanja letova Shuttlea uslijed tragedije izazvane eksplozijom Challengera u siječnju 1986. godine, satelit je trebalo znatno olakšati da bi se projekt mogao vratiti na raketu Delta, i to na zadnji let te rakete. Nakon svih peripetija i rizika lansiranja, nakon ukupno 15 godina priprema, COBE je konačno sa zebnjom lansiran u studenom 1989. Njegova uspješna misija trajala je po planu do 1993. godine.

COBE-ovi rezultati i njihov značaj

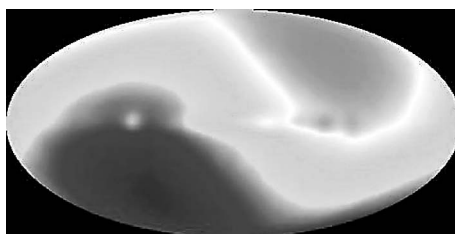
Pri dizajniranju projekta, velika je pažnja posvećena smještanju satelita u kružnu polarnu orbitu iz koje bi se moglo precizno izučavati cijelo nebo. Nakon što je to uspješno obavljeno, instrumentu FIRAS trebalo je samo devet minuta da isporuči mjerenje spektra zračenja crnog tijela (slika 2), najsavršenijeg do tada izmjereneog, temperature 2.725 ± 0.002 K. Takvu preciznost omogućilo je FIRAS-ovo referentno crno tijelo velike apsorptivne moći, od preko 99.99% (crno tijelo po definiciji apsorbira svu svjetlost koja do njega dođe). FIRAS je pokrивao spektar od 0.1 mm do 10 mm i radio je sve dok je bilo dovoljno tekućeg helija (do rujna 1990., do kada je prošao cijelim nebom 1.6 puta).



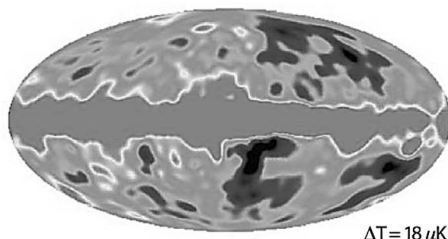
Spektar FIRASa (frekvencija u odnosu na intenzitet) s pogreškama mjerenja uvećanim 400 puta

Slika 2. Spektar pozadinskog zračenja kojega je izmjerio COBE-ov instrument FIRAS, najsavršeni je ikad izmjereni spektar crnog tijela (pogreške mjerenja povećane su na slici 400 puta).

Za izučavanje anizotropija trebalo je više vremena. Na temelju podataka skupljenih tijekom prvih šest mjeseci izmjerena je savršena dipolna anizotropija (slika 3). No kad je ona izuzeta iz pozadine, preostatak je bio izotropan. Tek nakon analize jednogodišnjih podataka počela se nazirati dodatna anizotropija (slika 4). Opažene temperaturne varijacije od $18 \mu\text{K}$ u skladu su s očekivanjem temeljenim na modelu Velikog praska, ukoliko uz “običnu” tvar postoji i nevidljiva “nebarionska” tvar. Važnost ovih mjerenja očituje se posebno u mogućnosti da se, u kombinaciji s ostalim mjerenjima, neizravno odrede gustoće različitih tvari i energije u svemiru. To je učinilo COBE prekretnicom prema kozmologiji kao preciznoj znanosti: teorijski kozmološki proračuni su se mogli usporediti sa stvarnim mjerenjima! Mjerenja su provedena kroz četiri godine opažanja, tijekom kojih je DMR u različitom poretku šest puta oslikao cijelo nebo. Podaci COBE-a skupljani su kroz šest “rogova” koji su brisali po svim smjerovima neba. Istodobnom uporabom nekoliko rogova, moglo se mjeriti nekoliko smjerova od po sedam lučnih stupnjeva, tako da se moglo usporediti njihove temperature međusobno, ali i s prosječnom temperaturom cijelog neba. U kasnijem pokusu WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) upotrijebljeni su rogovi s manjim kutom otvora, koji su omogućili bolju rezoluciju. Tople i hladne mrlje koje je na karti neba iscrtalo mjerenje DMR-a ocijenjene su kao najstarije opažene strukture. Uočljivo je da njihove dimenzije znatno premašuju one od jednog lučnog stupnja, unutar kojega bi to područje u prošlosti moglo biti kauzalno povezano i gdje bi temperatura bila izjednačena. Odgovor na ovu zagonetku nudi Veliki prasak praćen inflacijom (“inflacijski svemir”): Eksponencijalno brza ekspanzija iz ranog svemira preslikava ga na područja neba koja su prividno kauzalno nepoveziva.



Slika 3. Izmjerena dipolna anizotropija, koja dolazi od gibanja Zemlje, odnosno Sunčevog sustava, kroz pozadinsko zračenje stvoreno tijekom Velikog praska.



Slika 4. DMR-om izmjerene temperaturne varijacije otvorile su novu eru kozmoloških mjerenja. Na slici je isključeno područje galaktičkog diska Mliječne staze. Kao zanimljivost navedimo da je u galaktičkom području McKellar još 1941. godine našao pobuđena stanja CN molekule koja odgovaraju temperaturi 2.3 K, no nije bio svjestan značenja tog otkrića.

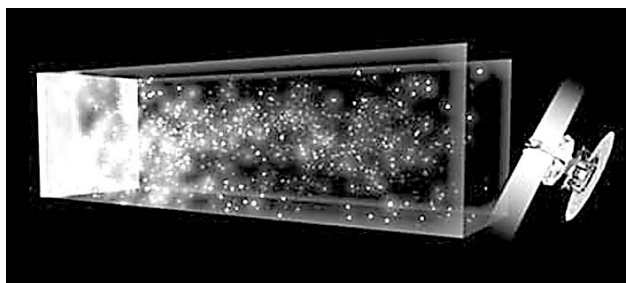
Da bi bilo jasno značenje tih rezultata, podsjetimo se osnovnih činjenica vezanih uz CMB kao potvrdu Velikog praska. Porijeklo CMB-a je u ekstremno vrućoj i gustoj ranoj fazi svemira, u kojoj se fotoni stvaraju u anihilacijama čestica i antičestica. Tako stvorena fotonska kupelj ekspanzijom svemira se hladi. Pri tome je ona neznatno kontaminirana neizanihilaranom materijom. Naime, mjerena entropija svemira S dana je opaženim omjerom bariona i fotona, $S = 5 \cdot 10^{-10}$. To govori da na svakih pet milijardi antikvarkova imamo višak od jednog kvarka, što daje preostalu tvar od koje će se formirati zvijezde i galaktike. Važni kozmički trenutak odnosi se na otprilike 380 000 godina starosti svemira, kad temperatura fotonske kupelji padne na 3000 K. Tu, naime, dolazi do vezanja elektrona i protona u električki neutralne vodikove atome pa se fotoni konačno mogu slobodno širiti. CMB dolazi od te kozmičke fotosfere u potpunoj analogiji s fotonima koji dolaze tek s površine Sunca, unutar kojeg u “raspršenjima” prosječno lutaju stotinu tisuća godina. Svemirska površina “zadnjih raspršenja” predstavlja zid neprozirnosti koji nas sprječava da putem fotona gledamo u raniji svemir. No same mrlje, koje je po prvi put razotkrio COBE, ipak otvaraju pogled u raniji svemir. One potječu otprilike iz vremena 100 000 godina starosti svemira, s tim da bi ta slika varijacija mogla biti zapisana još u prvim trenucima stvaranja svemira.

Ne čudi da je takvo COBE-ovo otkriće povuklo za sobom kako teorijska istraživanja mogućnosti testiranja kozmoloških modela i određivanja kozmoloških parametara, tako i nove eksperimentalne misije. Posebice su pokusi s balonima (MAXIMA i BOOMERANG) nastavili s izučavanjima anizotropija na manjim kutovima. Ustanovljeni “prvi akustični vrh”, na jednom lučnom stupnju, svojom je lokacijom utvrdio do na nekoliko postotaka da je geometrija svemira ravna (da se paralelni pravci neće presjeći ni na kozmološkim udaljenostima). Širina tog vrha dala je potporu inflacijskom ranom svemiru (da se Veliki prasak na samom početku odvija ekstremno brzom ekspanzijom). Dodatni opaženi vrhovi odgovaraju teorijski izučenim mehanizmima gravitacijskih nestabilnosti i ukazuju da barionska tvar u svemiru predstavlja samo 5% tvari potrebne da svemir učini ravnim. Još spektakularniji rezultati dolaze sa spomenute NASA-ine WMAP misije, koja je po osoblju i dizajnu izravni sljedbenik COBE-ovog DMR-a. Analize prve godine (vidjeti dolje citirani članak K. Kumeričkog) odnosile su se na dvostruko prolaženje cijelim nebom, koje se kao sfera opisuje tzv. sfernim funkcijama:

- Najniža, $l = 0$ “monopolna” komponenta odgovara srednjoj temperaturi CMB-a 2.725 ± 0.001 K, što po Planckovom zakonu zračenja odgovara gustoći broja fotona $n_\gamma = 411 \text{ cm}^{-3}$ i gustoći energije $\rho_\gamma = 0.260 \text{ eV cm}^{-3}$.
- Najveća anizotropija, dipol $l = 1$ s amplitudom 3.346 ± 0.017 mK, odgovara spomenutom gibanju Sunca kroz CMB, brzinom $v = 368 \pm 2 \text{ km s}^{-1}$.

Viši multipoli se mogu povezati s raznim kozmološkim parametrima i nakon prvih analiza objavljenih u veljači 2003., s nestrpljenjem se čekalo do ožujka ove godine na objavljivanje rezultata za tri godine WMAP-a. U kombinaciji s rezultatima drugih eksperimenata, određeni su glavni kozmološki parametri u scenariju koji uključuje i tamnu materiju i kozmološku konstantu:

- Starost svemira je 13.8 milijardi godina, a njegovo širenje je dano Hubbleovom konstantom, $H_0 = 71 \pm 2 \text{ km/s/Mpc}$.
- U sastav svemira ulazi $4.4 \pm 0.3\%$ obične (barionske) materije koju uglavnom čine atomi, a ostatak materije otpada na hladnu tamnu tvar nepoznate prirode ($22 \pm 2\%$).
- Ostatak inventara sačinjava još zagonetnija tamna energija ($74 \pm 2\%$), za koju istraživanja supernova daju uvjet na jednadžbu stanja ($w = -0.97 \pm 0.08$), konzistentnu s kozmološkom konstantom kojoj odgovara energija kvantno-mehaničkog vakuuma.



Slika 5. WMAP satelitsko mjerenje bilježi već spomenuto mrežkanje pozadinskog zračenja, anizotropiju na razini jednog dijela u sto tisuća.

Tamna energija je i prirodni kandidat za pogonitelja inflacije pri samom početku svemira, da bi imali smislenu sliku svemira Velikog praska. Sama inflacija pak, nudi objašnjenje za porijeklo anizotropija koje je po prvi put izmjerio COBE. Istodobno inflacija neočekivano nudi odgovor i na (sve do nje) otvoreno pitanje porijekla opaženih astronomskih struktura. Potrebne nehomogenosti oko kojih su se mogle formirati takve strukture, inflacija nalazi u kvantnim fluktuacijama pri samom početku svemira (slika 5). Inflacija strahovito brzom ekspanzijom donosi te mikroskopske fluktuacije na makroskopske dimenzije svemira. One su tamo posijane kao sjeme nakupljanja makroskopske tvari, kako je to prikazano na slici s naslovnice. Zapanjujuće otkriće COBE-a, da je vidljivi astronomski svijet preslika kvantnog svijeta sa samog početka svemira, je, po riječima Stephena Hawkinga, "najveće otkriće stoljeća, ako ne i svih vremena".

Literatura

- [1] <http://nobelprize.org/>
- [2] E-škola – Fizika svemira, http://eskola.hfd.hr/fizika_svemira/svemir.html
- [3] KREŠIMIR KUMERIČKI, *Nova mjerenja kozmičkog pozadinskog zračenja*, Matematičko-fizički list LIII (2003), 4, 278
- [4] IVICA PICEK, *Moderna kozmologija – trijumf i izazov fizike*, prilog za simpozij HAZU posvećen Godini fizike, 2005.
(http://www.phy.hr/~picek/Picek_HAZU05.pdf)